

SOFTWARE PROGRAM FOR ANALYSIS OF HRV OF CARDIO SIGNALS REGISTERED THROUGH ELECTROCARDIOGRAPHIC, HOLTER AND PHOTOPLETHYSMOGRAPHIC DEVICE

Galya Georgieva-Tsaneva

Institute of Robotics at the Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria

galitsaneva@abv.bg

СОФТУЕРНА ПРОГРАМА ЗА АНАЛИЗ НА ВСЧ НА КАРДИО СИГНАЛИ, РЕГИСТРИРАНИ ЧРЕЗ ЕЛЕКТРОКАРДИОГРАФСКО, ХОЛТЕРНО И ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФСКО УСТРОЙСТВО

***Abstract** The article presents a demonstration software program for evaluating three types of cardiac signals. Mathematical methods for analyzing electrocardiographic, photoplethysmographic and Holter signals are considered. The different cardio signals are analyzed from the presented information system and conclusions are drawn regarding their practical use. The article describes software procedures for the analysis and estimation of heart rate variability extracted from the heart rate registration signals.*

***Keywords:** ECG; PPG; Holter; Software Program; Cardio Device; HRV.*

1. Въведение

Сърдечносъдовите заболявания представляват голям процент от заболяванията както у нас така и в света. По тази причина тяхното наблюдаване и вземането на превантивни мерки е от голямо значение за опазване здравословното състояние на хората. Наложили са се три основни метода за регистриране на сърдечната дейност: електрокардиографски, фотоплетизмографски и холтер мониторинг. Изследванията на извлечената от тези биомедицински сигнали времева серия на вариабилността на сърдечната честота (ВСЧ) отразява здравословното състояние на индивида. ВСЧ

определя изменението във времето на продължителността на последователните сърдечни удари (времеви интервали между сърдечните удари).

Изследванията са показали, че високите стойности на параметрите на ВСЧ са показател за добро здраве и добро функциониране на вегетативната нервна система. Ниските стойности на параметрите на ВСЧ са показател за влошено здраве и нарушения в регулацията, оказвана от нервната система. Понижаване на ВСЧ се констатира и при наличие на фактори, оказващи стрес на организма [11]. Вариабилността на сърдечната честота може да бъде измерена чрез различни математически методи: линейни и нелинейни методи [16], методи, базирани на теорията на фракталите [7], уейвлет базирани методи [17], [18], Detrended fluctuation analysis (DFA) [9], [20], метод на Поанкаре, методи за оценка на параметъра на Хърст и много други. Статията анализира и сравнява резултатите от 3 вида кардиологични сигнали: фотоплетизмографски (ФПГ) и електрокардиографски (ЕКГ), записани с ФПГ устройство, което може да записва едновременно ЕКГ и ФПГ сигнали и холтерни записи, регистрирани от холтерно устройство за продължително наблюдение. ЕКГ и ФПГ сигнали са регистрирани чрез електронна сензорна система [4], разработена колектив по проект към ФНИ. При електрокардиографските и холтерните записи, ВСЧ параметрите се изчисляват върху получените RR интервали, определени от максималните амплитудни отклонения на сигнала – с максимум в точка R в QRS комплекса, а при ФПГ сигнали - върху PP интервали, където P точките за максималните амплитудни отклонения на регистрирания сигнал.

Целта на статията е да представи резултатите от проекта "Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на сърдечни данни", финансиран от Фонд „Научни изследвания“. Резултатите са получени с демонстрационна софтуерна система за изследване и математически анализ на регистрирани три вида кардио сигнали (получени от Холтер и създадено демонстрационно устройство за регистрация на ЕКГ и ФПГ сигнали).

2. Изложение

2.1. Обзор

Вариабилност на сърдечната честота определя изменението във времето на продължителността на интервалите между сърдечните пулсации. Това изменение е динамично, нелинейно и нестационарно. На математическия анализ на ВСЧ са посветени много изследвания през последните две десетилетия [1], [5], [8] и въпреки това явлението все още предстои да бъде изяснявано. Вариабилността на сърдечната честота дава най-пълна представа за влиянието на автономната нервна система върху дейността на сърдечно-съдовата система и върху целия човешки организъм [3], [6]. Чрез параметрите на ВСЧ може да се направи оценка на резултатите от взаимодействието между двата дяла на нервната система и сърцето [2]. Параметрите на вариабилността на сърдечната честота [12], [13], [14], [19] дават комплексна оценка на здравословния статус на индивида, както и на неговата способност да се

приспособява към промените на околната среда. Влияние на стресови ситуации, симулирани чрез 3D игри е разгледано в публикация [10].

2.2. Процедури за анализ на регистрираните сигнали

• Процедура за анализ във времевата област

Процедурата определя статистически параметри, които са стандартизирани в Стандарта за ВСЧ [15]. Параметрите се изчисляват върху нормалните NN интервали (получени след откриване на QRS комплексите и премахване на ектопичните комплекси, които не произхождат от синоатриалния възел). Определят се следните параметри:

- MeanRR/PP – средна стойност на RR/PP интервалите;
- SDNN (стандартна девиация на NN интервалите);
- SDANN (стандартна девиация на усреднените NN интервали);
- RMSSD (стандартна девиация на интервалите);
- SDNN index (средна стойност на NN интервалите в 5 минутни сегменти).

• Процедура за анализ в честотната област

Процедурата определя мощността на сигнала в три честотни области (много нискочестотна, нискочестотна и високочестотна). Програмата работи със следните гранични стойности на честотните интервали (които са зададени предварително и могат да се променят от потребителя):

- 0-0.04 – много нискочестотен (VLF);
- 0.04-0.15 – нискочестотен (LF);
- 0.15-0.4 – високочестотен (HF).

Резултатите се изчисляват върху 5-минутен сегмент от изследваните данни, съгласно препоръките на Стандарта [20].

• Процедура за анализ във времечестотната област

Изследванията включват числови изчисления и графически анализи посредством спектрограми. Създаването на спектрограми на пациенти с различни сърдечносъдови заболявания дава възможност за получаване на визуална представа на разпределението на мощността на сигнала чрез различно цветово представяне на мощността в графичното изображение на спектрограмата.

• Процедура за нелинеен анализ

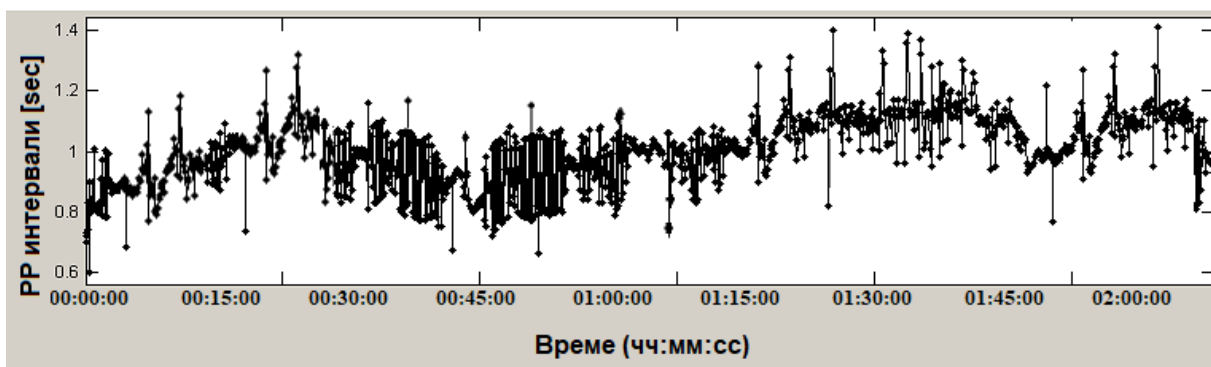
Методите за нелинеен анализ биват най-разнообразни, в това изследване ще бъдат представени DFA и хърст експонента.

- Detrended fluctuation analysis. DFA изследва корелациите между интервалите времеви серии посредством два параметъра: Alpha1 – дава представа за кратковременните флуктуации във времевия ред и Alpha2 – чрез него се изследват дългосрочните флуктуации;
- Хърст експонента – определена чрез класическия R/S метод. В това изследване е приложен върху регистрираните кардио данни.

3. Резултати

Създадена е демонстрационна софтуерна програма на C# в среда на Microsoft Visual Studio. Резултатите от проведените анализи с използването на описаните процедури на представената демонстрационна програма са представени в табличен вид. Резултатите са дадени като средна стойност и статистическо отклонение (ср. ст-т± ст.отк.). Проучванията в тази статия са направени върху реални кардиологични записи (регистрирани са три вида сигнали: ЕКГ, ФПГ, Холтер).

На фигура 1 е показана ВСЧ серия получена при регистрацията за кардио сигнал чрез фотоплетизмографско устройство.



Фигура 1. ВСЧ серия – РР интервали.

Параметри	Група синкоп (n=12)	Група здрави (n=12)	p-value
	(ср. ст-т± ст.отк.)	(ср. ст-т± ст.отк.)	
Mean RR (ms)	878.89±149.04	846.53±86.32	NS
Mean HR (bpm)	68.33±43.39	70.64±36.09	NS
SDNN (ms)	145.9±38.93	140.9±43.76	<0.05
SDANN (ms)	137.89±59.34	143.68±38.48	<0.05
SDindex (ms)	69.31±34.86	64.27±11.59	NS
RMSSD (ms)	69.79±14.87	39.36±14.59	<0.05

Таблица 1. Резултати от времевата процедура

Изследвани са двучасови ВСЧ серии при времевия анализ и 5 минутни серии на ВСЧ (според препоръките на стандарта) при честотния анализ на регистрираните кардиологични серии. Изследванията са проведени върху две групи хора – пациенти, които са диагностицирани със сърдечносъдово заболяване (синкоп) от лекар кардиолог (12 индивида) и контролна здрава група от доброволци (12 индивида). Възрастта на изследваните индивиди е от 35 до 60 годишна възраст и за двете групи. Във всяка група има по 6 мъже и 6 жени. Няма съществени различия в демографските характеристики на изследваните индивиди. Направено е изследване за значимост на получените стойности, посредством използване на Т тест.

Статистическа значимост се приема при стойност на параметъра $p < 0.05$. Стойностите на p параметъра, за които изследваните показатели нямат съществено значение са отбелязани с NS (No Significant). Резултатите от определяне на параметрите във времевата област (таблица 1) показват наличие на статистическа значимост за параметрите SDNN, SDANN и RMSSD. По тези параметри може да бъде направено разграничаване на болните индивиди от здравите хора.

Параметри	Група синкоп (n=12)	Група здрави (n=12)	p-value
	(ср. ст-т± ст.отк.)	(ср. ст-т± ст.отк.)	
VLF (уейвлет метод) (ms^2)	1429.86±979.59	1364.23±979.42	NS
LF (уейвлет метод) (ms^2)	711.19±382.37	1031.22 ±425.23	<0.05
HF (уейвлет метод) (ms^2)	857.76±671.83	428.322±186.22	<0.05
LF/HF (уейвлет метод)	1.31±1.12	2.41±1.38	<0.001

Таблица 2. Резултати от честотната процедура

Резултатите от анализа в честотната област (таблица 2) са определени посредством уейвлет базиран метод. Определена е мощността на изследвания сигнал в трите изследвани честотни области (VLF, LF и HF). Изчислено е и отношението на мощността на сигнала в ниската честотна област към мощността във високата честотна област LF/HF, известно като симпатовагален баланс.

Резултатите показват наличие на статистическа значимост за мощността на сигнала в нискочестотната и високочестотната област и на показателя на синпатовагалния баланс (LF, HF, LF/HF). Тези параметри могат да се използват за разграничаване на болните от здравите индивиди.

Параметри	Група синкоп (n=12)	Група здрави (n=12)	p-value
	(ср. ст-т± ст.отк.)	(ср. ст-т± ст.отк.)	
alpha_all DFA	1.05±0.16	1.01±0.04	NS
alpha1 DFA	0.63±0.18	1.31±0.08	<0.0001
alpha2 DFA	1.14±0.16	0.96±0.06	<0.001
Hurst (уейвлет метод)	0.79±0.18	0.91±0.08	<0.05

Таблица 3. Резултати от нелинейната процедура

Резултатите от изпълнението на нелинейната процедура (реализирането на DFA и R/S метода за определяне на хърст експонентата) върху сериите на ВСЧ на здрави и болни индивиди (таблица 3) показват наличие на статистическа значимост за параметрите alpha1, alpha2 и хърст експонентата (определена чрез класическия R/S статистически метод). Изследванията показват намаляване на хърст експонентата при пациентите със синкоп (0.79), спрямо здравата контролна група, при която този параметър има висока средна стойност (0.91). Параметрите alpha1, alpha2 и хърст

експонентата могат да се използват за разграничаване на болните от здравите индивиди.

Проведени са изследвания върху три вида кардиологични сигнали, регистрирани по фотоплетизмографски метод, чрез ЕКГ сензор и чрез Холтер. Получените резултати са представени в Таблица 4. Резултатите показват, че и при трите вида сигнали се получават сходни резултати, което показва, че ЕКГ, Холтер, ФПГ сигнали могат да се използват взаимозаменяемо за провеждане на клинични изследвания и научни проучвания.

Параметри		Група 1 ЕКГ (ср. ст-т± ст.отк.)	Група 2 Holter (ср. ст-т± ст.отк.)	Група 3 PPG (ср. ст-т± ст.отк.)
Времени домейн	MeanRR/PP [ms]	782.34±207.07	769.42±258.09	792.03±214.99
	SDNN [ms]	122.11±14.84	121.77±20.11	123.07±22.19
	SDANN [ms]	107.33±31.42	115.32±32.09	114.02±30.11
	RMSSD [ms]	28.54±8.23	27.41±9.14	30.02±8.38
	SDindex [ms]	62.44±16.45	65.83±20.77	66.12 ±22.32
Честотен домейн	Power VLF [ms^2]	3097.82±413.55	3126.99±411.56	2996.09 ±423.67
	Power LF [ms^2]	687.07±241.36	692.11±378.01	703.98 ±355.96
	Power HF [ms^2]	585.75±291.73	583.07±257.68	601.98 ±257.88
	Power LF [н.е.]	0.54±0.23	0.54±0.18	0.53±0.64
	Power HF [н.е.]	0.46±0.19	0.46±0.31	0.47±0.75
	LF/HF	1.17±0.61	1.19±0.94	1.17±0.88
DFA	alpha1	1.19±0.21	1.17±0.23	1.19±0.35
	alpha2	1.26±0.18	1.24±0.19	1.18±0.24
R/S метод	хърст експонента	0.78±0.33	0.76±0.32	0.73±0.26

Таблица 4. Резултати от проведения анализ върху 3 вида кардио сигнали

Проведеният паралелен анализ на изследваните три вида сигнали (ЕКГ, ФПГ, Холтер), показва сходни резултати при изследване на вариабилността на сърдечната честота и следователно трите метода за ВСЧ анализ могат да се използват равностойно. Изборът на конкретния метод може да бъде направен според всеки конкретен индивидуален случай. Получените числови и графични резултати показват понижена вариабилност на сърдечната честота при изследваните индивиди със сърдечна недостатъчност спрямо здравите индивиди.

Заклучение

Статията представя информационна софтуерна система за анализиране на три вида кардиологични данни. Разгледани са сигнали, регистрирани чрез електрокардиографски, фотоплетизмографски метод и чрез холтер мониторинг. Описани са софтуерните процедури за анализ и оценка на вариабилността на сърдечната честота, която е показател за здравословното състояние на човешкия организъм. Представени са резултатите от анализа във времевата и честотната област, както и от нелинейния анализ за пациенти, диагностицирани със синкоп и здрави индивиди. Проведен е статически анализ, чрез който може да се определи статическата значимост на стойностите на изследваните параметри.

Благодарности

Научното изследване е проведено като част от проекта „Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“ № КП-06-Н22/5 от 07.12.2018 г., финансиран от Фонд „Научни изследвания“ на Република България.

References // Литература

- [1] Becerra-Luna, B.; Martínez-Memije, R.; Cartas-Rosado, R.; Infante-Vázquez, O.; Sánchez-García, J.C.; Sánchez-Pérez, G. (2019). "Optimal Window for the Estimation of Very Low Frequency Content in Heart Rate Variability Analysis". In: Lhotska, L., Sukupova, L., Lacković, I., Ibbott, G. (eds) World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018. IFMBE Proceedings, vol 68/2, pp. 331–334. Springer, Singapore, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-9038-7_62
- [2] Berger, R.D.; Akselrod, S.; Gordon, D.; Cohen, R.J. (1986). "An efficient algorithm for spectral analysis of heart rate variability". in IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-33, no. 9, pp. 900-904, Sept. 1986. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.1986.325789>
- [3] Björkander, I.; Forslund, L.; Ericson, M.; Rehnqvist, N.; Hjemdahl, P.; Kahan, T. (2009). "Long-term stability of heart rate variability in chronic stable angina pectoris, and the impact of an acute myocardial infarction". Clinical Physiology and Functional Imaging. 2009, vol. 29, Iss. 3 pp. 201-208, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2009.00857.x>
- [4] Cheshmedzhiev, K.; Gospodinova, E.; Gospodinov, M.; Lebamovski, P. (2021). "Electronic sensor system for registering ECG and PPG signals". CompSysTech '21: International Conference on Computer Systems and Technologies '21 Ruse Bulgaria June 18 - 19, 2021, Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 2021, ISBN:978-1-4503-8982-2, pp. 141-144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3472410.3472422>

- [5] Dong, S.Y.; Lee, M.; Park, H.; Youn, I. (2018). “Stress resilience measurement with heart-rate variability during mental and physical stress”. In Proceedings of the 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Honolulu, HI, USA, 18–21 July 2018; pp. 5290–5293, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8513531>
- [6] Evans, S.; Seidman, L.C.; Tsao, J.C.; Lung, K.C.; Zeltzer, L.K.; Naliboff, B.D. (2013). “Heart rate variability as a biomarker for autonomic nervous system response differences between children with chronic pain and healthy control children”. *J. Pain Res.* 2013, 6, pp. 449–457, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2147/JPR.S43849>
- [7] Gospodinova, E.; Lebamovski, P.; Gospodinov, M. (2021). “Automatic analysis of ECG signals based on their fractal and multifractal properties”. International Conference on Computer Systems and Technologies '21, Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 2021, ISBN: 978-1-4503-8982-2, pp. 136-140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3472410.3472421>
- [8] Johnston, B.W.; Barrett-Jolley, R.; Krige, A.; Welters, I.D. (2019). “Heart rate variability: Measurement and emerging use in critical care medicine”. *Journal of the Intensive Care Society.* 2020; 21(2), pp. 148-157. Epub 2019 Jun 11. PMID: 32489411; PMID: PMC7238479, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/1751143719853744>
- [9] Krishnam, R.; Chatlapalli, S.; Nazeran, H.; Haltiwanger, E.; and Pamula, Y. (2005). “Detrended Fluctuation Analysis: A Suitable Long-term Measure of HRV Signals in Children with Sleep Disordered Breathing”. 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Shanghai, China, 2005, pp. 1174-1177, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2005.1616632>
- [10] Lebamovski, P. (2022). “Analysis of Methods and Approaches for Evaluation of Heart Rate Variability”, Science Series “Innovative STEM Education”, volume 04, ISSN: 2683-1333, Institute of Mathematics and Informatics – Bulgarian Academy of Sciences, pp. 39-47, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55630/STEM.2022.0406>
- [11] Lebamovski, P. (2022). “Impact of Stress on Heart Rate Variability”. *Proceedings of CBU in Medicine and Pharmacy*, 3, pp. 13-18, 2022. <https://ojs.cbuic.cz/index.php/pmp/article/view/315> (last view: 24-03-2023). DOI: <https://doi.org/10.12955/pmp.v3.315>
- [12] Lee, S.; Hwang, H.B.; Park, S.; Kim, S.; Ha, J.H.; Jang, Y.; Hwang, S.; Park, H.-K.; Lee, J.; Kim, I.Y. (2022). “Mental Stress Assessment Using Ultra Short Term HRV Analysis Based on Non-Linear Method”, *Biosensors*, 2022, 12, 465, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12070465>
- [13] Lombardi, F.; and Stein, P.K. (2011). “Origin of heart rate variability and turbulence: an appraisal of autonomic modulation of cardiovascular function”. *Frontiers in Physiology*, 2011. Vol. 2: ISSN: 1664-042X, pp. 1–7, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00095>

- [14] Lu, G.; Yang, F.; Taylor, J. A.; Stein, J. F. (2009). "A comparison of photoplethysmography and ECG recording to analyse heart rate variability in healthy subjects". *Journal of Medical Engineering & Technology*. 2009, Vol. 33, No. 8, pp. 634-641, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3109/03091900903150998>
- [15] Malik, M. (1996). "Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology". *Circulation*. 1996. Vol.93(5), pp. 1043–1065, 1996. Available: https://www.escardio.org/static_file/Escardio/Guidelines/Scientific-Statements/guidelines-Heart-Rate-Variability-FT-1996.pdf (last view: 24-03-2023).
- [16] Milena, Č.; Romano, C.; De Tommasi, F.; Carassiti, M.; Formica, D.; Schena, E.; Massaroni, C. (2023). "Linear and Non-Linear Heart Rate Variability Indexes from Heart-Induced Mechanical Signals Recorded with a Skin-Interfaced IMU". *Sensors* 2023, 23, 1615, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23031615>
- [17] Neshitov, A.; Tyapochkin, K.; Smorodnikova, E.; Pravdin, P. (2021). "Wavelet Analysis and Self-Similarity of Photoplethysmography Signals for HRV Estimation and Quality Assessment". *Sensors*, 21, 6798, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21206798>
- [18] Redlarski, G.; Siebert, J.; Krawczuk, M.; Zak, A.; Danilowicz-Szymanowicz, L.; Dolinski, L.; Gutknecht, P.; Trzeciak, B.; Ratkowski, W.; Palkowski, A. (2020). "Wavelet Transform Analysis of Heart Rate to Assess Recovery Time for Long Distance Runners". *Electronics* 2020, 9, 2189. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9122189>
- [19] Rich, M.W.; Saini, J.S.; Kleiger, R.E.; Carney, R.M.; teVelde, A.; Freedland, K.E. (1988). "Correlation of heart rate variability with clinical and angiographic variables and late mortality after coronary angiography", *The American Journal of Cardiology*, Volume 62, Issue 10, Part 1, 1988, ISSN 0002-9149, Pages 714-717, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(88\)91208-8](https://doi.org/10.1016/0002-9149(88)91208-8)
- [20] Valencia, J.F.; Vallverdú, M.; Schroeder, R.; Voss, A.; Cygankiewicz, I.; Vázquez, R.; Bayés de Luna, A.; Caminal, P. (2009). "Detrended Fluctuation Analysis of Heart Rate by Means of Symbolic Series". *Computers in Cardiology* 2009; 36:405–408, 2009. Available at: <https://cinc.org/archives/2009/pdf/0405.pdf> (last view: 24-03-2023).

Received: 30-03-2023

Accepted: 29-06-2023

Published: 24-07-2023

Cite as:

Georgieva-Tsaneva, G. (2023). "Software Program for Analysis of HRV of Cardio Signals Registered through Electrocardiographic, Holter and Photoplethysmographic Device", *Science Series "Innovative STEM Education"*, volume 05, ISSN: 2683-1333, pp. 53-61, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55630/STEM.2023.0507>